

## **ЭФФЕКТЫ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ ПЕРЕПОЛЯРИЗАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТГС**

**В. Ф. Горностаев**

Тверской государственный университет,  
*кафедра общей физики*

Анализируются явления задержки во времени процессов поляризации и переполяризации монокристалла ТГС при ступенчатом изменении электрического поля и его коммутации. Отмечается влияние некоторых факторов на эти процессы (время действия электрического поля, процессы старения, длительность импульсов переполяризации, число переключений поля, наличие примесей, отжиг кристаллов). Объяснение полученных результатов проводится на основе представлений о конкуренции процессов стабилизации спонтанной поляризации и эффектов экранирования внешнего электрического поля.

**Ключевые слова:** *запаздывающие процессы поляризации и переполяризации, эффект Баркгаузена, сегнетоэлектрические кристаллы, триглицинсульфат*

## **TIME LAG EFFECTS DURING QUASISTATIC POLARIZATION REVERSAL IN TGS SINGLE CRYSTALS**

**V. F. Gornostaev**

Tver State University,  
*Chair of General Physics*

Time lag effects of polarization and polarization reversal processes in TGS crystals with step-like changes of the electric field and its commutation are analyzed. The influence of a number of factors on these processes is pointed out (time of electric field action, aging processes, polarization reversal pulse durations, number of field commutations, impurities, crystal annealing). The obtained results are interpreted on the notion of competition between the processes of spontaneous polarization stabilization and external field screening.

**Keywords:** *delayed processes of polarization and polarization reversal, Barkhausen effect, ferroelectric crystals, triglycinesulphate*

**1. Введение.** Уже на ранних стадиях изучения процессов поляризации монокристалла ТГС Чайновисом и Абелем [1] отмечалось явление “запаздывания” при наблюдении бокового расширения доменных стенок при ступенчатом изменении электрического поля от 30 до 35 В/см. На рис. 1 представлена наблюдавшаяся в этой работе типичная картина тока переполяризации. Хотя поле приложено к

кристаллу в момент времени  $t = 0$ , происходит задержка до 0,4 с в появлении тока.

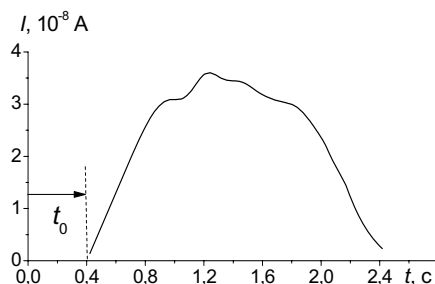


Рис. 1. Типичная картина тока переполаризации при ступенчатом изменении поля в области 30...35 В/см (по Чайновису и Абелю [1]).

При параллельном исследовании эффекта Баркгаузена и тока переключения в состаренных кристаллах триглицинсульфата [2] нами неоднократно отмечалось явление запаздывания не только на примере тока переполаризации, но и эффекта Баркгаузена. При этом обращала на себя внимание синхронность во времени процессов установления полной поляризации кристалла и той части необратимой поляризации, которая обусловлена скачками Баркгаузена. На рис. 2 изображены дифференциальные кривые распределения скачков Баркгаузена (кривая 1) и переключаемого заряда (кривая 2) во времени при коммутации электрического поля 40 В/см. Как видно, при таком способе изменения электрического состояния кристалла задержка начала процесса переполаризации (при данной чувствительности установки) составляла во времени более 10 секунд.

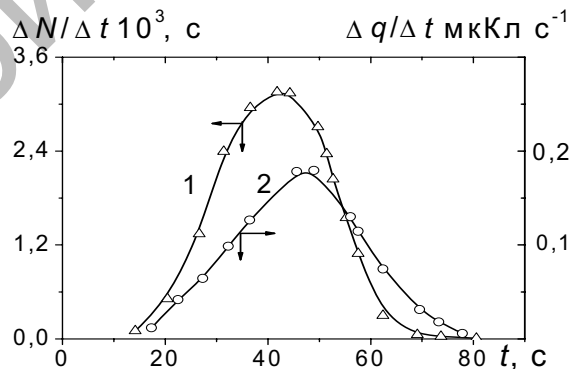


Рис. 2. Дифференциальные кривые распределения скачков Баркгаузена (кривая 1) и переключаемого заряда (кривая 2) во времени при коммутации электрического поля 40 В/см ( $\Delta t = 5$  с)

Интересно было выяснить, является ли такое запаздывание уникальным, возникающим только в слабых электрических полях, или же оно присуще любой стадии переполаризации кристалла, но при определенных внешних факторах. Для выяснения этого вопроса нами были исследованы:

- а) влияние времени выдержки образцов монокристалла ТГС под полем (перед его коммутацией) на протекание эффекта Баркгаузена и тока переключения,
- б) влияние процессов старения, длительности импульсов переполаризации и числа коммутаций поля,
- в) наличие в кристалле примесей различной концентрации,
- г) влияние отжига кристаллов.

**2. Методика эксперимента.** Экспериментальная установка, с помощью которой проводились параллельные исследования эффекта Баркгаузена и тока переключения, принципиально не отличалась от описанной в [2, 3]. Чувствительность по эффекту Баркгаузена составляла  $\Delta P > 10^{-14}$  К·см. Ток переключения фиксировался при номинальных значениях шкалы самописца-микроамперметра Н 373-2 0,5, 1,5 и 15 мкА. Параллельно исследуемому образцу и сопротивлению считывания включался универсальный вольтметр В7-16, с помощью которого контролировалось изменение напряжения на кристалле в любые моменты времени при его переполаризации. Оценка параметров импульсов Баркгаузена производилась с помощью осциллографа С1-54. Изменение электрического состояния кристалла производилось методом коммутаций электрического поля.

### **3. Полученные результаты и их обсуждение.**

#### *3.1. Влияние времени выдержки образцов в поле (до коммутации)*

Приводимые результаты получены на образцах монокристалла ТГС, представлявших собой пластинки Y-среза, вырезанные из пирамиды роста грани (101), толщиной 2 мм и площадью электродов 69 мм<sup>2</sup> [3]. Образцы экранировались и термостатировались при температуре  $20 \pm 0,5^{\circ}$  С.

На образец, деполяризованный переменным электрическим полем промышленной частоты после 20-минутной выдержки в закороченном состоянии, накладывалось постоянное электрическое поле (75 В/см), в котором образец выдерживался в течение заданного времени  $\tau$ . Выдержка в поле варьировалась от 1 мин. до 4 сут. Затем приложенное поле изменялось на противоположное; параллельно фиксировались ток переключения и скачки Баркгаузена.

Значение поля, в котором производилась выдержка кристалла, устанавливалась несколько выше порогового поля [4, 5] (поля, соответствующего пороговой скорости изменения электрического состояния кристалла, выше которой скачкообразные процессы играют всё меньшую роль). Для нашего случая пороговое поле составляло 42 В/см. При этом мы полагали, что выводы, сделанные в работе [6] для титаната бария, окажутся справедливыми и для кристаллов триглицинсульфата.

Результаты проведённых исследований приведены на рис.3.

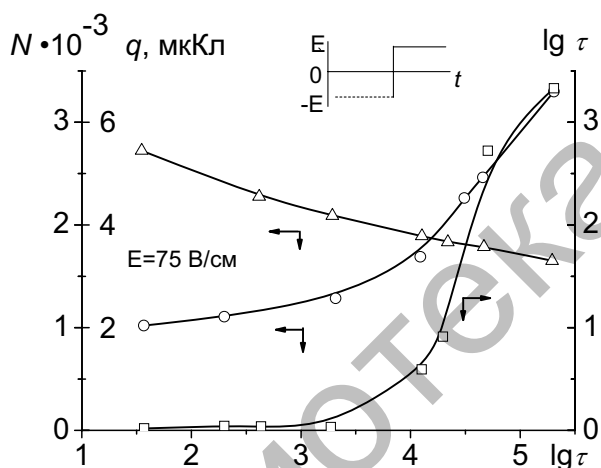


Рис. 3. Зависимость переключаемого заряда (кривая 1), числа скачков переполаризации (кривая 2) и времени запаздывания (кривая 3) от времени выдержки кристалла ТГС перед коммутацией поля 75 В/см.

Как и следовало ожидать [6, 7], величина переключаемого заряда  $q$  (кривая 1) с ростом  $\tau$  стала монотонно уменьшаться и после 4-х суток предварительной выдержки она уменьшилась почти на одну треть от первоначального значения. Это свидетельствовало о стабилизации доменной структуры, и, следовательно, выключении части поляризации кристалла из процесса переполаризации. Однако число скачков Баркгаузена, вопреки всем ожиданиям, не только не уменьшилось, а, наоборот, стало монотонно расти с увеличением  $\tau$  (кривая 2 на рис. 3). И, неожиданно, при относительно больших  $\tau$  стало обнаруживать себя и явление запаздывания (кривая 3, рис. 3). Образец необходимо было выдержать под полем противоположного знака почти 1 час, чтобы обнаружить это явление. При 3 ч. 40 мин. задержка начала процесса переполаризации составляла всего лишь 4 с., при 9 ч. 30 мин. – 8 с, а при 4-х сутках она достигла значения 32,5 мин.

Обращает на себя внимание, что задержка в появлении скачков и тока переключения начала отчётливо проявляться примерно при таких же значениях  $\tau$ , когда наиболее заметно стало наблюдаться и увеличение числа скачков переполаризации. Следует заметить, что при этом дифференциальные кривые распределения скачков во времени стали носить более сглаженный характер, а их максимумы стали смещаться в сторону больших времён. Чаще стали наблюдаться скачки куполообразной формы, что говорит в пользу зародышеобразования с последующим боковым движением доменной стенки [8]. При больших  $\tau$  возрастает и диэлектрическая вязкость  $\beta$ , расчет которой проводился по формулам, приведенным в [5]. Это еще раз свидетельствует о затруднении условий разрастания зародышей обратной фазы при больших значениях  $\tau$  (вследствие роста  $\beta$  подвижность доменных стенок  $\mu$ , естественно, уменьшается).

Полученные зависимости можно объяснить, если принять во внимание, что наряду с возникновением внутреннего поля, экранирующего спонтанную поляризацию кристалла, на процесс переполаризации в кристаллах ТГС заметное влияние оказывает и экранирование внешнего поля, что становится особенно заметным при больших выдержках кристалла под полем. В этом случае, как показано в работе [9], вблизи электродов создаётся большой пространственный заряд, на рассасывание которого и уходит энергия внешнего поля обратного знака. Экспериментально это проявляется в запаздывании начала процесса переполаризации. Чем больше время  $\tau$ , тем дольше будет происходить разрушение заряда в приэлектродной области.

Также будет расти и число скачков Баркгаузена, т.к. при меньших скоростях движения доменной стенки в поле выше порогового (когда переполаризацией охвачен фактически весь объём кристалла) произойдёт большее число взаимодействий её с дефектами кристаллической решётки и разрушающимся свободным зарядом.

### *3.2. Влияние числа коммутаций электрического поля*

Объектами исследования были образцы Y-среза состаренного монокристалла ТГС следующих толщин: 0,69, 0,78 и 0,86 мм. Коэффициент усиления установки по эффекту Баркгаузена составлял  $10^4$ . Перед каждым измерением образцы приводились в определенное исходное состояние выдержкой в переменном электрическом поле ( $U = 80$  В) на частоте 50 Гц в течение 10 минут. После трехминутного отдыха в закороченном состоянии включалось электрическое поле, коммутированное не более 10 раз. Время выдержки образца в поле при каждой коммутации соответствовало 3 мин. Контроль за состоянием кристалла осуществлялся осциллографированием петель гистерезиса тока и заряда с помощью схемы Сойера-Тауэра на частоте 50 Гц.

Наряду с зависимостями числа скачков Баркгаузена от числа коммутаций в различных электрических полях нами [10] получены дифференциальные кривые распределения числа скачков переполаризации во времени (рис. 4) при каждой коммутации. Характерной особенностью этих кривых является то, что, во-первых, в большинстве полей с ростом числа коммутаций кривые распределения числа скачков Баркгаузена во времени приобретают всё более сглаженный характер, во-вторых, меняется положение максимума дифференциального распределения числа скачков во времени (смещается в сторону больших времён), при этом, как видно из рисунка, растёт и время запаздывания.

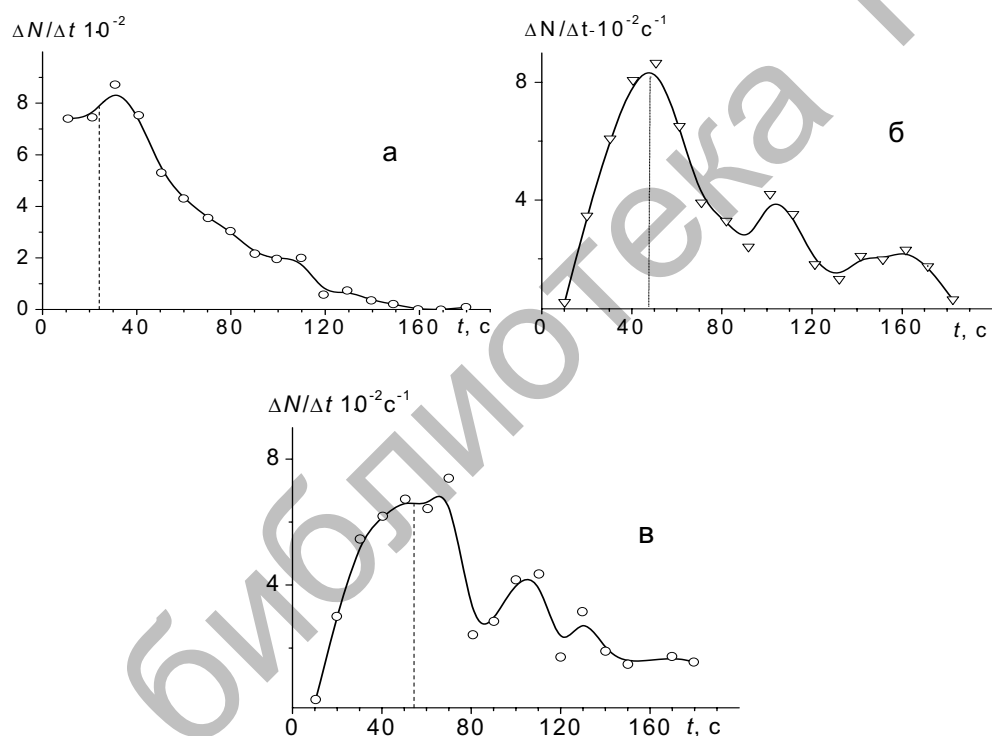


Рис. 4. Дифференциальные кривые распределения числа скачков переполаризации во времени при каждой коммутации.  $T = 3$  минуты. (а) – вторая, (б) – шестая, (в) – восьмая коммутация

При объяснении полученных результатов, очевидно, следует учесть тот факт, что образцы монокристалла ТГС перед исследованиями находились в процессе естественного старения (примерно 1,5 года). Как известно, в состаренных образцах происходит миграция дефектов различного типа к доменным стенкам, приэлектродным областям,

неоднородностям структурного характера и т.д., при этом в этих областях кристалла создаются достаточно сильные микрополя, которые оказывают действие на стабилизацию доменной структуры.

Выдержка кристалла под полем соответствующего направления приводит к дополнительному накоплению объёмных зарядов вблизи доменных стенок и, следовательно, к ещё большей стабилизации доменной структуры. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению переполяризуемого объёма кристалла с каждой последующей коммутацией, отсюда возникает и уменьшение числа скачков Баркгаузена в зависимости от числа коммутаций в слабых электрических полях.

В сильных же полях (150...300 В/см) наряду со стабилизацией спонтанной поляризации начинает сказываться и экранирующее действие внешнего поля. Увеличение числа коммутаций импульсами одинаковой длительности приводит к возникновению "усталости" исследованных образцов, выражающееся в увеличении времени запаздывания появления скачков Баркгаузена после изменения знака поля на противоположное, уменьшении их числа в зависимости от числа коммутаций, сглаживании максимумов дифференциального распределения числа скачков во времени и смещении их в сторону больших времён.

### *3.3. Влияние естественного старения*

Исследования неоднократной квазистатической переполяризации естественно состаренных монокристаллов ТГС проводились при двух длительностях импульсов  $T = 3$  и  $5$  минут при температуре  $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$  на той же установке и тех же образцах, что и в работе [10]. Время старения превысило 2,5 года. Отжиг образцов производился в закороченном состоянии на воздухе при температуре  $94^\circ\text{C}$  в течение 5 часов.

Из анализа полученных данных следует, что в естественно состаренных и в омоложенных кристаллах характер зависимости  $N(n)$ , где  $N$  – число скачков Баркгаузена,  $n$  – число коммутаций поля, в целом остаётся без изменения, т.е. в слабых полях наблюдается уменьшение числа скачков с увеличением количества коммутаций, однако с ростом  $T$  в отожжённых кристаллах спад становится менее выраженным, и даже обнаруживается независимость в распределении  $N(n)$ .

В более высоких полях так же, как и ранее, чётко проявляется неоднозначность в поведении  $N(n)$ , т.е. наблюдаются возрастающие, уменьшающиеся и экстремальные зависимости числа скачков переполяризации от числа коммутаций электрического поля. Эти особенности характерны для областей порогового поля или близких к нему. Отжиг кристалла приводит к смещению порогового поля в сторону сильных полей. В полях, превышающих пороговое более, чем в

2-3 раза, число скачков Баркгаузена или не зависит от  $n$  (при малых  $T$ ), или увеличивается с ростом  $n$ . Последняя тенденция в большей степени обнаруживает себя в естественно состаренных образцах, о чём можно судить по рис. 5.

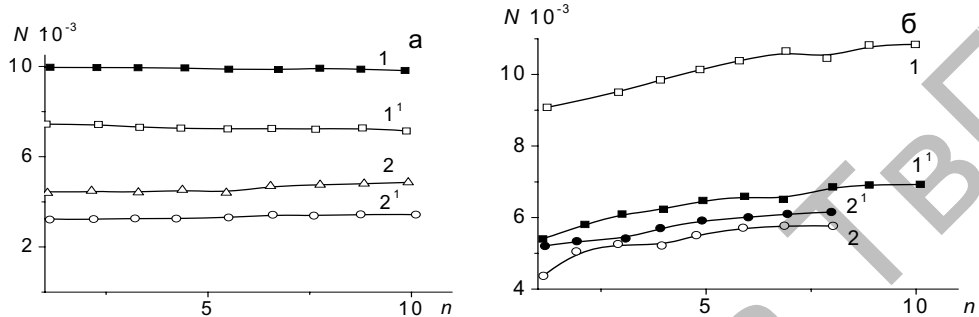


Рис. 5. Зависимость числа скачков Баркгаузена от числа коммутаций электрического поля. (а)  $T = 3$  мин.,  $E = 91$  (кривые 1, 1') и 145 В/см (2, 2'), (б)  $T = 5$  мин.,  $E = 93,4$  (кривые 1, 1') и 228 В/см (2, 2'). Кривые 1, 2 соответствуют коммутации поля с минуса на плюс, 1', 2' - с плюса на минус

К особенностям процессов реполяризации состаренных кристаллов ТГС (как при  $T = 3$  мин, так и при  $T = 5$  мин) можно отнести наличие значительных запаздываний в появлении скачков Баркгаузена после изменения знака поля на противоположное. С ростом числа коммутаций время запаздывания может значительно колебаться (рис. 6), увеличиваясь, уменьшаясь или оставаясь приблизительно постоянным.

Естественное старение кристалла приводит к сглаживанию дифференциальных кривых распределения числа скачков Баркгаузена во времени, особенно с ростом числа циклов реполяризации (числа коммутаций поля). В последнем случае обнаруживается тенденция к уменьшению времени следования числа скачков реполяризации. Проведённая оценка времён релаксации путём построения зависимости  $\ln(1 - N/N_0)$  от  $t$ , где  $N_0$  – общее число скачков Баркгаузена для данной коммутации,  $N$  – число скачков, соответствующее данному моменту времени  $t$ , показала, что во всех исследованных полях наблюдаются, по крайней мере, два времени релаксации. Начиная с полей, примерно равных пороговому и выше, обнаруживается и третье время релаксации, (рис. 7).



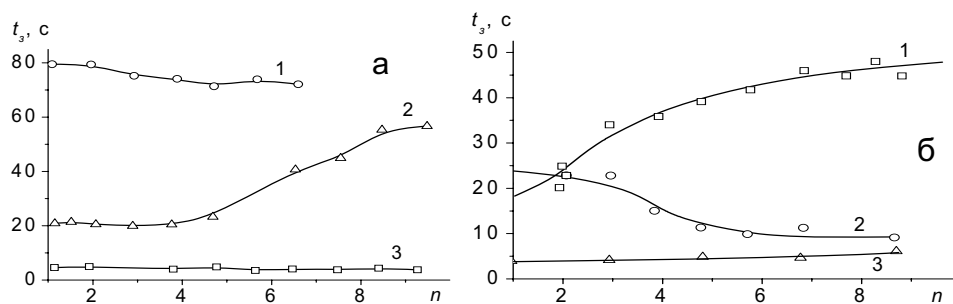


Рис. 6. Зависимость числа скачков Баркгаузена от числа коммутаций электрического поля. (а)  $T = 3$  мин.,  $E = 29,4$  (кривая 1),  $32,7$  (2) и  $91$  В/см (3), (б)  $T = 5$  мин.,  $E = 47,2$  (кривые 1, 2) и  $93,5$  В/см (3). Кривые 1, 3 соответствуют коммутации поля с минуса на плюс, 2 - с плюса на минус

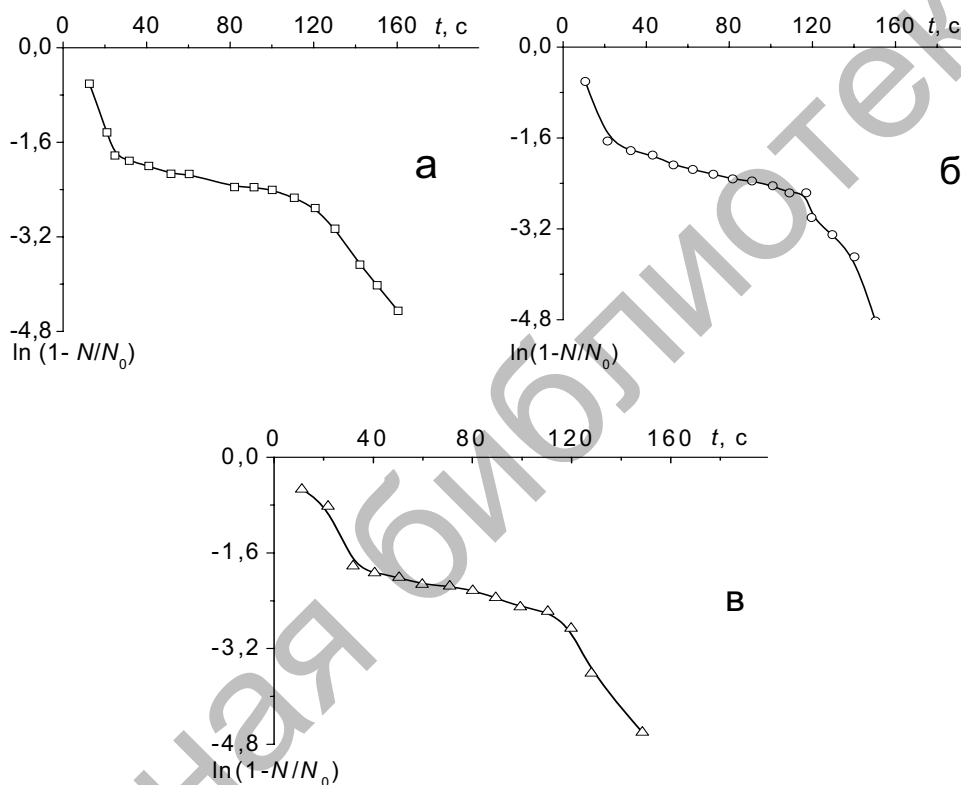


Рис. 7. Зависимость  $\ln(1 - N/N_0)$  от времени при коммутации электрического поля  $81$  В/см и  $T = 3$  минуты. (а) – первая, (б) – пятая, (в) – десятая коммутация

Такого же рода зависимости, полученные для отождённых кристаллов, показали, что, во-первых, в омоложенных кристаллах отсутствует явление "запаздывания", во-вторых, время релаксации, отвечающее за зародышеобразование, больше, чем в состаренных образцах, в-третьих, процесс переполаризации такого кристалла идёт медленнее, что коррелирует с данными работы [11], причём время переполаризации увеличивается с ростом числа коммутаций электрического поля.

При исследовании зависимости интегрального числа скачков Баркгаузена от величины внешнего электрического поля при его изменении методом коммутаций (рис. 8) обращает на себя внимание, что для более "молодых" образцов кристалла кривая 1 зависимости имеет максимум распределения в районе 90 В/см, однако здесь же присутствуют и локальные (более мелкие) максимумы распределения. Кривая 2 имеет сравнительно узкую область порогового поля, к тому же и величина его уменьшилась почти в 2 раза

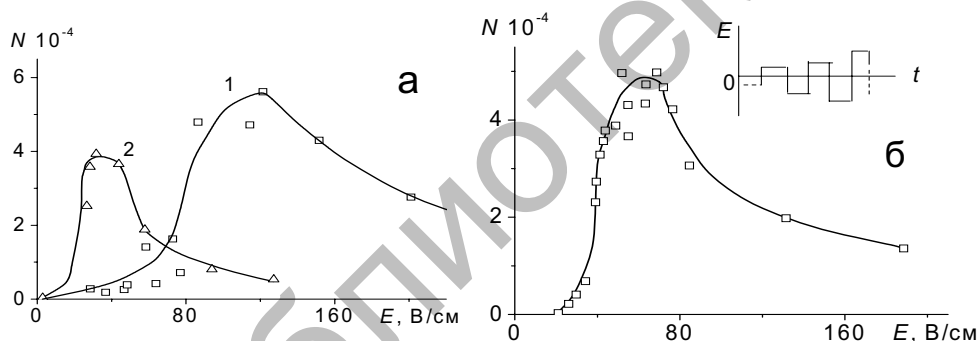


Рис. 8. Зависимость интегрального числа скачков Баркгаузена от поля при его коммутации. (а) состаренные, (б) отождённые образцы. Кривая 1 соответствует старению 1,5 года; кривая 2 – 2,5 года

Из сравнения этого распределения с распределением числа скачков переполаризации от количества коммутаций видно, что наибольшая неоднозначность (экстремальные зависимости, наибольший разброс) в поведении  $N(n)$  приходится на область пороговых полей (или локальных экстремумов) как для свежих и состаренных, так и для отождённых образцов (рис. 8, б).

Увеличение числа коммутаций, с нашей точки зрения, увеличивает вероятность процессов, аналогичных процессам, наблюдаемым при длительных выдержках кристалла в полях выше пороговых (об этом свидетельствуют запаздывания в появлении скачков Баркгаузена после изменения его направления на противоположное). Как известно [12], в этом случае формируется поле, значение которого

растёт с увеличением времени выдержки и направление которого противоположно внешнему. Рост внутреннего поля сопровождается уменьшением действующего (эффективного) переполаризующего поля внутри кристалла. Таким образом, если происходит коммутация внешнего поля  $E_{вн}$  выше  $E_{пор}$ , то поведение  $N(n)$  можно объяснить следующим образом. При малых  $n$  и  $T$   $E_{вн}$  незначительно отличается от  $E_{эф}$ . С увеличением  $n$   $E_{эф}$  всё больше отличается от  $E_{вн}$  вследствие роста экранирующего поля. При некотором значении  $n$   $E_{эф}$  станет равным  $E_{пор}$ . При такой коммутации мы должны были бы получить максимум числа скачков переполаризации, однако при дальнейшем увеличении  $n$  (равносильном увеличению времени выдержки) в поле, выше порогового, возникает процесс названный нами "разэкранировкой" внешнего поля, который приводит к росту числа скачков Баркгаузена. Очевидно, этим и объясняется увеличение времени запаздывания  $t_3$  с ростом  $n$  в этих полях. Но в высоких полях сказывается и процесс стабилизации спонтанной поляризации, который должен приводить к уменьшению числа скачков переполаризации. Поэтому, если  $T$  мало, то с ростом  $n$  мы наблюдаем или слабый спад, или независимость, или незначительный рост числа скачков (рис. 5, а), если же  $T$  велико, то наблюдается увеличение числа скачков (рис. 5, б).

Если коммутация электрического поля происходит в районе порогового поля, то процесс установления равновесного значения поляризации обусловлен конкуренцией указанных выше факторов: процессом экранирования  $P_s$  и процессом формирования внутреннего поля, экранирующего внешнее. По-видимому, третье время релаксации, показанное на рис. 7, и отображает этот процесс.

#### 3.4. Влияние примесей

Исследованы полевые и временные зависимости эффекта Баркгаузена при неоднократной квазистатической переполаризации образцов различных толщин монокристалла ТГС, легированных ионами меди  $Cu^{2+}$  различной концентрации (2,2; 6,8; 7,3; 7,4)·10<sup>-3</sup> вес. %, в интервале полей от 10 до 160 В/см [14]. Выделяются две области электрических полей, где зависимости числа скачков переполаризации от количества коммутаций явно отличается одна от другой.

В очень слабых полях (20...38 В/см) для образцов ТГС:Cu<sup>2+</sup> всех концентраций характер поведения зависимости  $N = f(n)$  существенным образом определяется длительностью импульсов переполаризующего поля. При различных  $T$  (1; 3; 5 мин.) число скачков с увеличением количества коммутаций может или монотонно уменьшаться, или испытывать тенденцию увеличения, или не зависеть от  $n$ .

В более высоких полях (44...140 В/см) в функции распределения  $N(n)$  при незначительном росте заметно насыщение. В этих же полях

для образцов с концентрацией  $C = (6,8; 7,3; 7,4) \cdot 10^{-3}$  вес. % обнаруживается значительный разброс в указанном распределении.

Из анализа кривых распределения числа скачков во времени проведена оценка характерных времён релаксации при каждой коммутации электрического поля путём построения зависимости  $\ln(1 - N/N_0) = f(t)$ . Из этих кривых следует, что в области слабых электрических полей при различных  $T$  с увеличением  $n$  время релаксации может как расти, так и уменьшаться. В более высоких полях имеет место тенденция к появлению двух, а в отдельных случаях и трёх времён релаксаций. С увеличением количества коммутаций первое время растёт, второе – уменьшается, третье – несколько возрастает.

При небольших концентрациях ионов меди возможно улучшение диэлектрических свойств монокристалла ТГС, поскольку увеличивается подвижность доменных стенок [15], следовательно, уменьшается время, отвечающее за этот процесс. С повышением концентрации ионов меди наблюдается ухудшение диэлектрических свойств из-за закрепления доменной структуры примесью [16]. В этом случае ионы меди, образуя устойчивые комплексы с глицином, затрудняют переполяризацию, что приводит к росту соответствующего времени релаксации. Рост числа коммутаций поля способствует этому процессу. Третье время релаксации, по-видимому, отображает процесс изменения внутреннего поля на противоположное. Как видно из релаксационных зависимостей, это время растёт с ростом  $n$  для всех приведённых концентраций  $\text{Cu}^{2+}$ . В легированных монокристаллах ТГС также обнаружены запаздывания в появлении скачков Баркгаузена после изменения знака поля на противоположное. Однако, если в нелегированных кристаллах это время могло изменяться в значительных пределах (особенно с ростом числа коммутаций) вплоть до 50...80 секунд, то в легированных образцах это время почти стабильно для множества случаев изменения поля и равно 3...5 с., только в отдельных случаях достигая 20 с.

Отжиг легированных кристаллов ТГС: $\text{Cu}^{2+}$  приводит к таким же эффектам, что и при отжиге состаренных нелегированных кристаллов ТГС, т.е. отсутствует явление запаздывания, процесс переполяризации идёт медленнее, время переполяризации растёт с ростом  $T$  и  $n$ , пороговые поля смещаются в сторону высоких полей.

**Выводы.** Явление запаздывания начала процесса переполяризации в кристаллах триглицинсульфата может быть инициировано как выдержкой кристалла в поле обратного знака, увеличением длительности  $T$  импульса переполяризации и количества циклов переполяризации (числом коммутаций поля), так и при исследовании кристаллов, находящихся в состоянии длительного процесса естественного старения.

Длительная выдержка кристалла в поле выше порогового приводит к уменьшению переключаемого заряда, что является следствием стабилизации спонтанной поляризации, к росту числа скачков Баркгаузена и времени запаздывания с увеличением  $\tau$ , что обусловлено процессами, происходящими при разэкранировке внешнего поля.

При значительных  $\tau$  растёт вероятность переполяризации кристалла за счёт зародышеобразования с последующим боковым движением доменной стенки.

Отжиг кристалла во всех исследованных случаях снимает явление запаздывания.

### **Список литературы**

1. Chynoweth A.G., Abel J.L. // J. Appl. Phys., 1959, v. 30, № 7, p. 1073.
2. Рудяк В.М., Горностаев В.Ф. // Изв. вузов. Физика, 1970, № 5, С. 84.
3. Горностаев В.Ф. // Сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики, Тверь, 1998, С.107.
4. Рудяк В.М., Горностаев В.Ф. // ФТТ, 1969, 11, № 9, С. 2499.
5. Рудяк В.М. // Процессы переключения в нелинейных кристаллах. М., "Наука", 1986, С. 112.
6. Горностаев В.Ф., Лабутин В.М. и др. // Изв. АН СССР. Сер. Физ., 1975, Т. 39, № 5, С. 1028.
7. Рудяк В.М., Горностаев В.Ф. и др. // Изв. вузов. Физика, 1975, № 6, С.34.
8. Рудяк В.М., Богомолов А.А., Иванов В.В. // Сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики, Калинин, 1977, С.10.
9. Мелешина В.А. // Кристаллография, 1971, Т. 16, № 3, С.557.
10. Горностаев В.Ф., Смирнов А.И. // Эффект Баркгаузена и его использование в технике, Калинин, 1981, С.90.
11. Рудяк В.М., Камаев В.Е., Комлякова Н.С. // Релаксационные явления в твёрдых телах, М., 1968, С.613.
12. Богомолов А.А., Иванов В.В., Рудяк В.М. // Изв. АН СССР, Сер. Физ., 1975, Т. 39, № 5, С.1000.
13. Stankowska G. // Acta Phys. Polon, 1967, Т.31, № 3, Р.527.
14. Горностаев В.Ф., Смирнов А.И., Корина Р.В. // Сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики, Тверь, 1995, С.142.
15. Цедрик М.С., Кравченя Э.М. // Структура и свойства сегнетоэлектриков, Минск, 1978, С.94.
16. Желудев И.С., Лудупов Ц.Ж. // Изв. АН СССР, Сер. Физ., 1967, Т.31, № 7, С. 1184.

*Об авторе:*

ГОРНОСТАЕВ Виктор Фёдорович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей физики ТвГУ.